

界面强化技术在 CO₂制甲醇三相反应器中的传质-反应协同规律

李小东

新特硅基新材料有限公司 新疆乌鲁木齐

【摘要】CO₂制甲醇技术中，三相反应器的传质 - 反应协同效率是制约转化性能的关键。界面强化技术通过优化气 - 液 - 固三相界面结构，可显著改善传质速率与反应活性的匹配性。其通过调控气泡分散度、液膜厚度及催化剂表面润湿性，强化 CO₂在液相中的溶解与扩散，同时促进反应中间体在催化剂表面的吸附与转化。阐明界面强化下传质 - 反应的协同规律，能为反应器结构设计与操作参数优化提供理论依据，对提升 CO₂加氢制甲醇的转化率与选择性具有重要意义。

【关键词】界面强化技术；CO₂制甲醇；三相反应器；传质 - 反应协同；转化效率

【收稿日期】2025年8月12日 **【出刊日期】**2025年9月17日 **【DOI】**10.12208/j.jccr.20250048

The synergistic law of mass transfer and reaction of interface enhancement technology in three-phase reactors for CO₂-to-methanol conversion

Xiaodong Li

Xinte Silicon based New Materials Co., Ltd., Urumqi, Xinjiang

【Abstract】 In CO₂-to-methanol technology, the synergistic efficiency of mass transfer and reaction in three-phase reactors is a key factor restricting conversion performance. Interface enhancement technology can significantly improve the matching between mass transfer rate and reaction activity by optimizing the gas-liquid-solid three-phase interface structure. It enhances the dissolution and diffusion of CO₂ in the liquid phase by regulating bubble dispersion, liquid film thickness, and catalyst surface wettability, while promoting the adsorption and conversion of reaction intermediates on the catalyst surface. Clarifying the synergistic laws of mass transfer and reaction under interface enhancement can provide a theoretical basis for reactor structure design and operating parameter optimization, and is of great significance for improving the conversion rate and selectivity of CO₂ hydrogenation to methanol.

【Keywords】 Interface enhancement technology; CO₂-to-methanol; Three-phase reactor; Mass-transfer-reaction synergy; Conversion efficiency

引言

CO₂加氢制甲醇是实现碳资源循环利用的重要途径，三相反应器作为核心设备，其内部气-液-固三相界面的传质与反应过程直接影响整体效能。传统反应器中，传质阻力与反应速率不匹配的问题普遍存在，限制了 CO₂转化效率的提升。界面强化技术为突破这一瓶颈提供了新思路，其通过精准调控界面行为，可实现传质过程与催化反应的高效协同。探究其间的协同规律，不仅能深化对多相反应体系的认知，更为推动 CO₂制甲醇技术的工业化应用提供关键支撑。

1 CO₂制甲醇三相反应器中传质-反应协同的现存问题

CO₂制甲醇三相反应器中，传质与反应过程的协同失衡是制约整体效能的核心症结，其具体表现贯穿于气-液-固三相作用的各个环节，形成多维度的制约体系。气液相间传质阻力过大导致 CO₂溶解效率不足。CO₂作为气相反应物，需先突破气液界面进入液相才能参与反应，而传统反应器中气泡尺寸分布不均，大尺寸气泡上升速率快，在液相中的停留时间短，未能充分溶解便逸出体系，造成原料浪费^[1]。气液界面张力过高加剧了这一问题，使得 CO₂在液相中难以分散成微小气泡，有效接触面积受限，传质速率无法满足后续反应需求。液相中的 CO₂浓度梯度分布不合理，靠近气泡界面区域浓度较高，而远离界面的催化剂周围浓度偏低，形成传

质滞后，导致反应位点因底物供应不足而活性闲置，形成“传质瓶颈-反应低效”的恶性循环。

液固界面反应动力学与传质过程不匹配引发催化效率衰减。催化剂表面的活性位点是反应发生的核心区域，但其催化效能的发挥高度依赖于液相中 CO₂与 H₂的传质速率。当传质速率低于反应消耗速率时，催化剂表面易出现底物“饥饿”状态，导致活性位点利用率下降；而当传质速率过高，未反应的底物在催化剂表面过度积累，会引发副反应，生成甲烷等非目标产物，降低甲醇选择性。液固界面的扩散边界层厚度不均进一步加剧了这种不匹配，边界层过厚会阻碍反应产物从催化剂表面脱附，形成“产物抑制”效应，使传质-反应的协同平衡被打破，整体转化效率受限。三相流场分布不均破坏传质-反应的时空协同性。反应器内的流体力学行为直接影响三相接触模式，传统搅拌式反应器中易出现局部涡流与死体积，导致催化剂颗粒在液相中分布不均，部分区域催化剂浓度过高引发团聚，减少有效反应面积；部分区域催化剂稀疏，传质过来的 CO₂无法及时转化^[2]。气相气泡在上升过程中受液相流速影响，易在反应器上部聚集，与底部催化剂接触不足，形成“气相富集-反应缺位”的空间错配。这种流场不均导致传质过程与反应需求在时间与空间上无法同步，降低了整体协同效率，使得反应器出力与设计预期存在显著差距。界面特性调控缺失导致传质-反应协同难以稳定维持。气液界面的润湿性、液固界面的吸附性能等界面特性，对传质速率与反应活性具有决定性影响，但传统反应器缺乏对这些特性的动态调控手段。

2 界面特性对 CO₂制甲醇三相反应器传质-反应协同的作用机制

界面特性作为连接 CO₂制甲醇三相反应器中传质与反应过程的核心纽带，其物理化学性质的变化直接调控着传质效率与反应活性的协同关系，通过多维度作用机制影响整体转化效能。气液界面特性通过调控传质驱动力影响协同基础。气液界面张力的大小决定了 CO₂气泡的分散行为，低界面张力环境下气泡易破碎为微米级分散相，显著增大气液接触面积，为 CO₂从气相向液相的传质提供充足通道^[3]。界面润湿性的差异改变传质方向，当液相为亲 CO₂体系时，界面处 CO₂的吸附能降低，促进其跨越界面进入液相主体，减少传质阻力。界面电荷分布对传质过程具有选择性调控作用，带负电的气液界面可通过静电引力富集 CO₂分子（其在水中解离后带负电），形成局部高浓度区域，为后续向催化剂表面的传质提供浓度梯度驱动力，使传质速

率与反应消耗速率形成初步匹配。

液固界面特性通过优化反应微环境强化协同效率。催化剂表面的亲疏水性决定了液相反应物的吸附与扩散行为，适度亲水的表面可促进含 H₂O 的反应介质在活性位点周围形成有序排列，加速 H₂的解离与 CO₂的活化^[4]。液固界面的粗糙度影响反应位点的暴露程度，纳米级粗糙结构能增加比表面积，同时形成“微对流”效应，减少扩散边界层厚度，使传质过来的 CO₂快速到达活性中心。界面化学吸附能的调控是关键，当催化剂表面对 CO₂的化学吸附能处于适中范围时，既能保证其有效吸附以启动反应，又能避免过度吸附导致的活性位点堵塞，实现“吸附-反应-脱附”的动态平衡，使传质供应与反应消耗保持协同。三相界面张力的平衡关系决定传质-反应的空间协同性。气-液-固三相接触线的长度与分布直接影响三相物质交换效率，当三相界面张力满足杨氏方程平衡条件时，液体能在催化剂表面充分铺展，气体则以细小气泡形式分散于液膜中，形成“气-液-固”紧密接触的微环境，缩短 CO₂从气相到催化剂表面的传质路径。三相界面的动态更新频率影响协同持续性，在搅拌或流动作用下，三相界面不断破裂与重组，可及时移除反应产物，补充新鲜反应物，避免产物在界面区域积累形成的传质阻力，维持传质与反应的高效协同。

这种电荷层面的协同作用，将传质的物理过程与反应的化学过程通过电子传递紧密耦合，形成“传质-电荷转移-反应”的高效协同链条^[5]。界面活性物质的吸附行为介导传质-反应的协同调控。气液界面吸附的表面活性剂可通过降低界面张力稳定气泡，同时其分子链结构能定向引导 CO₂分子的扩散路径，提高传质选择性。液固界面吸附的助剂分子能修饰催化剂表面活性位点的电子状态，增强对 CO₂的活化能力，使传质过来的 CO₂更易发生反应转化。界面活性物质的动态吸附-解吸平衡，可根据传质速率与反应需求的变化调整界面特性，如当传质速率过高时，助剂分子通过占据部分活性位点减缓反应速率，实现传质与反应的动态协同。

3 基于传质-反应协同规律的界面强化技术优化策略

基于传质-反应协同规律的界面强化技术优化，需针对三相反应器中不同界面的作用机制，从结构设计、材料改性与操作调控等维度构建系统性策略，实现传质效率与反应活性的动态匹配。气液界面的靶向强化可突破传质驱动力瓶颈。通过引入超亲 CO₂材料修饰

反应器内壁，降低气液界面张力，促进 CO₂气泡的微细化分散，增加气液接触面积的同时，缩短 CO₂分子跨越界面的扩散距离。采用多孔介质分布器构建梯度孔径结构，使气泡在上升过程中经历“破碎-融合-再破碎”的动态过程，维持传质界面的持续更新，避免局部浓度梯度衰减。在液相中引入可循环的 CO₂载体，通过可逆化学吸附增强 CO₂在液相中的溶解度，载体与 CO₂形成的复合物能定向迁移至催化剂表面并释放底物，既提升传质速率，又确保与反应消耗的节奏同步。

液固界面的精准调控可优化反应微环境协同。对催化剂表面进行亲疏水性梯度修饰，在活性位点区域构建适度亲水微区，加速 H₂O 与 H₂的吸附解离；在非活性区域引入疏水基团，减少反应产物在界面的滞留，促进甲醇脱附^[6]。采用等离子体刻蚀技术构建纳米级粗糙结构，利用“微对流”效应减薄液固界面的扩散边界层，使传质过来的 CO₂快速到达活性中心，同时通过粗糙度调控增加活性位点的暴露概率。调控催化剂表面的化学吸附能，通过掺杂非金属元素调整活性中心的电子密度，使 CO₂的吸附能处于“有效活化-易脱附”的最优区间，实现“吸附-反应-脱附”的高效循环。

三相界面的协同强化可提升空间匹配度。基于杨氏方程设计反应器内构件，通过调整导流板角度与间距，优化三相接触线的分布与长度，使液体在催化剂表面形成均匀液膜，气泡以细小分散态穿越液膜，缩短 CO₂从气相到催化剂表面的传质路径^[7]。采用旋转填充床等强化设备，利用离心力增强三相湍流程度，提高界面更新频率，及时移除界面区域的反应产物，避免形成传质阻力。在反应器内设置多孔催化剂载体，其孔隙结构可同时容纳气相气泡、液相介质与固相催化剂，形成“气-液-固”微尺度共存的反应单元，强化三者的空间协同^[8]。界面电荷转移的定向调控可增强动力学协同。在气液界面引入带电纳米颗粒，通过调控颗粒表面电荷密度形成定向电场，驱动 CO₂分子（解离后带负电）向催化剂表面迁移，同时促进 H₂的解离与电子传递，使传质过程与电荷转移步骤同步。对催化剂进行半导体改性，调整液固界面的肖特基势垒高度，使其与反应中间体的能级匹配，加速电子转移效率，降低 CO₂加氢的活化能垒，使反应速率与传质速率形成动态平衡。构

建“导电载体-催化剂”复合结构，利用载体的导电性强化界面电荷传导，将传质带来的底物快速转化为反应中间体，减少电荷积累导致的反应阻滞。

4 结语

探究界面强化技术在 CO₂制甲醇三相反应器中的传质-反应协同规律，对提升 CO₂转化效率意义重大。明确现存问题及界面特性的影响机制，进而优化界面强化技术策略，可推动传质与反应高效协同。这不仅为三相反应器的设计改进提供理论支撑，也为 CO₂制甲醇技术的工业化应用助力，对实现碳资源循环利用具有重要价值。

参考文献

- [1] 耿戴云,袁姜勇,王春良,等.二氧化铈改性三维大孔铜锌催化剂催化二氧化碳加氢制甲醇[J].洁净煤技术,2025,31(06):118-126.
- [2] 林振利,解勤勤,谢楠楠,等.CO₂ 加氢制甲醇工业催化剂结构及操作条件影响模拟研究[J].洁净煤技术,2025,31(06): 108-117.
- [3] 唐蜜,刘少华,周红生,等.二氧化碳加氢合成甲醇催化剂研究进展[J].精细与专用化学品,2024,32(09):14-18.
- [4] 叶知远,饶娜,夏菖佑,等.CO₂ 加氢制甲醇催化剂与项目进展[J].洁净煤技术,2024,30(08):150-161.
- [5] 苏静,张宗飞,张大洲.二氧化碳加氢制甲醇的技术进展及展望[J].化肥设计,2022,60(02):6-9+14.
- [6] 徐敏杰,朱明辉,陈天元,等.CO₂ 高值化利用: CO₂ 加氢制甲醇催化剂研究进展[J].化工进展,2021,40(02):565-576.
- [7] 时永兴,林刚,孙晓航,等.二氧化碳加氢制甲醇过程中铜基催化剂活性位点研究进展[J].化工进展,2023,42(S1):287-298.
- [8] 于杨.疏水改性对铜系二氧化碳加氢合成甲醇催化剂性能的影响[J].合成化学,2025,33(06):423-431.

版权声明：©2025 作者与开放获取期刊研究中心(OAJRC)所有。本文章按照知识共享署名许可条款发表。

<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



OPEN ACCESS